

コージェネレーション用ボイラの動特性に関する研究*

(第1報, コールドスタートとウォームスタート時の実験結果)

藤井 照重^{*1}, 太田 淳一^{*1}, 蔣 安衆^{*2}
木島 和夫^{*3}, 金加 貴史^{*1}

A Study on Dynamic Characteristics of Combined Cogeneration Boilers

(1st Report, Experimental Results at Cold and Warm Starts)

Terushige FUJII, Junichi OHTA, A. Z. ZIANG,
Kazuo KIJIMA, and Takashi KINKA

In a system constructed by combining a gas turbine with a generator and an unfired waste-heat-recovery boiler, the exhausted gas becomes the heat input to the boiler and thus, the characteristics of this heat input obviously differ from those of the heat input to a conventional boiler system. To clarify the dynamic characteristics of the unfired waste-heat-recovery boiler, a simple natural-circulation loop tube was manufactured to simulate an actual boiler. The experiments on dynamic responses with step changes in heat input were carried out for the cold start of about 10 °C and the warm start of 50°C or 90°C. Dynamic responses such as the drum pressure, the drum water level and the natural-circulation velocity were clarified experimentally.

Key Words: Power Plant, Cogeneration, Dynamic Responses, Water Level, Natural-Circulation Boiler

1. 緒 言

コージェネレーションシステムはエネルギー有効利用の観点から近年、注目を浴びている。このうち、ガスタービンと排ガスボイラを組合せたコージェネレーションシステムではガスタービンの排ガス熱量が、ボイラの入力熱源となる。しかし、ガスタービンの起動特性は熱容量の大きい自然循環ボイラに比べると非常に速く、しかも、ピークロード用として使われるために起動停止の頻度の多い運転が要求される。したがってボイラドラムの水位制御、さらにはドラム外への水滴のキャリーオーバー防止などの点から特にボイラの立上り時の動的特性をより明確にしておく必要がある。ところで、定常運転時からのボイラ外乱に対するドラム圧力などの動特性に関する研究は従来から多くなされているが^{(1)~(6)(10)}、コージェネレーション用ボイラで頻繁に行われるコールドスタート、ウォームスタート時について圧力、温度、ドラム水位、水循環速度の各応答を系統的に調べた例は非常に少なく、水位応答に関してはまだ実験定数的取扱いに頼っている現状にあ

る。ここでは、それらを明らかにするため排ガス自然循環ボイラを模擬した小形装置を製作し、コールドスタート、ウォームスタート時、さらに加熱量、蒸気流量弁開度、給水流量弁開度をステップ状に変化させた場合の動的特性実験を行い、ドラム圧力、水位、温度、ボイラの水循環速度、および静的特性として定常時の蒸発管の圧力損失、蒸気管出口のボイド率などを調べた。本報では、コールドスタート、ウォームスタート時の実験結果について報告する。なお他の外乱に対する応答結果および解析については次報以下で述べる。

2. 実験装置および方法

実験用ボイラの概略図を図1に示す。全体の高さは4.36 mで各部の寸法は次のようである。①上部ドラム：内寸法90×127 mmのく形断面で高さ1.424 m、②蒸発管：内径27.2 mm肉厚3.4 mm、長さ2.785 m、③降水管：内径12.7 mm肉厚2.3 mm、④下部ドラム：内径130.8 mm、高さ151 mmである。計画にあたって蒸発管と降水管の総断面積比および熱流束は蒸発量6.4 t/hの実機のボイラに準拠し、実験装置の内径と加熱量を決定した。

水位変動および流動状況を観察するために、上部ドラムにはガラス窓⑤を、蒸発管と降水管にはおのおの

* 原稿受付 平成元年8月24日。

^{*1} 神戸大学工学部 (〒657 神戸市灘区六甲台町1-1)。

^{*2} 東北電力学院 (〒132012 中国吉林省吉林市)。

^{*3} 神戸大学大学院。

ガラス管⑥を設置した。またドラム水面の波打ちを抑えるため、多孔板⑩(孔径 $\phi 4\text{ mm} \times 106$ 個, $t=1.5\text{ mm}$)をドラム底面から約 10 cm の位置に取付けた。上部ドラム水位はビデオカメラ撮影により、自然循環速度は蒸発管下部の可視部でレーザドップラ流速計⑬(Kanomax 製 SYSTEM 8003 C, 光ファイバ式プローブ: FLVP-B 1881)により、そして蒸発管出口ボイド率は点電極法⑫(Kanomax 製: L 形 0582)によりおのおの測定した。加熱は長さ 2 m 間の交流直接通電方式をとり、流体は工業用水とした。実験方法は、まず静特性実験では上部ドラム内圧力が所定の圧力($0.10, 0.15, 0.20\text{ MPa}$)になるように蒸気流量調節弁⑦を調節し、定常状態下の諸量を測定した。次に動特性では表1に示すような条件で蒸気流量弁⑦を少し開いた状態で加熱を行い、圧力が立ち上がる直前に⑦を閉じ、圧力が 0.3 MPa になると装置設計圧力限界のため加熱を止めた。なお実験範囲はいずれも圧力が $0.1 \sim 0.2\text{ MPa}$ 、温度は 9°C からその圧力の飽和温度までである。

3. 実験結果

3.1 静特性結果

3.1.1 蒸発管出口ボイド率 圧力 $P=0.1\text{ MPa}$

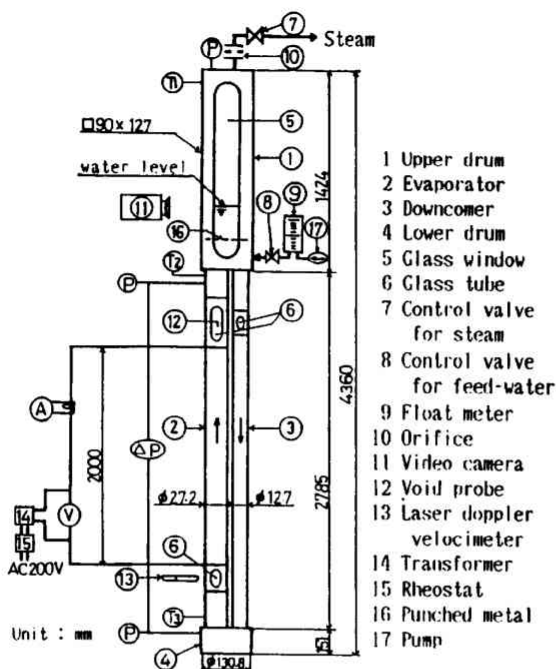


図1 実験装置

の場合における蒸発管出口平均ボイド率 $\bar{\alpha}_e$ の測定結果(図2中○印)を計算結果(図2中実線)と併せ図2に示す^{**1}。ここで計算値は次の Thom の式⁽⁸⁾から算出された。

$$\bar{\alpha}_e = \frac{\gamma \cdot x_e}{1 + x_e(\gamma - 1)} \quad (1)$$

ここで、

$$\gamma = \left\{ 0.93 \cdot \left(\frac{\rho_l}{\rho_g} \right)^{-0.89} + 0.07 \cdot \left(\frac{\rho_l}{\rho_g} \right)^{-0.439} \right\}^{-1}$$

ρ_l, ρ_g : 飽和水, 飽和蒸気の密度 kg/m^3

x_e : 蒸発管出口の乾き度

蒸発管での放熱量 ΔQ がボイド率に影響するので計算結果は ΔQ をパラメータとして示し、沸騰開始点は蒸発管入口温度の測定から算出された。図2より加熱量が増加すると蒸発管出口ボイド率も増加し、 Q に対する傾向は両者よく一致している。いずれの加熱量も

表1 動特性の実験条件

	Initial pressure P_0 MPa	Heat input Q kW	Initial water temp. T_0 $^\circ\text{C}$	Initial water height h_0 m
Cold start	0.10	1.2	11.0	0.304
		2.5	10.0	0.300
		3.9	9.0	0.300
Warm start	0.10	1.2	50.0	0.300
			90.0	0.300
		2.5	50.0	0.300
			90.0	0.300
		3.9	50.0	0.306
			90.0	0.300

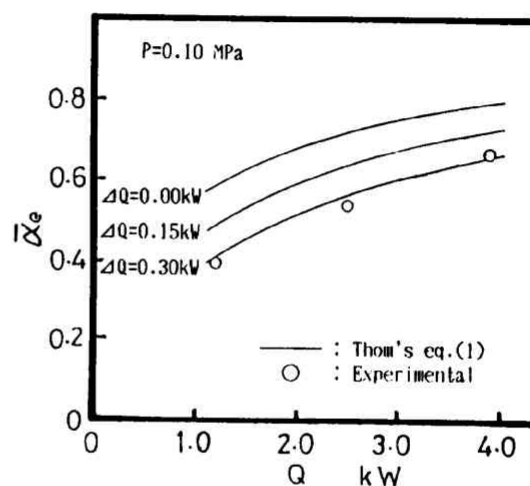


図2 蒸発管出口の平均ボイド率

^{**1} 蒸発管出口の可視部(図1中⑥)での写真撮影および目視観察から本流動様式は $P=0.10, 0.15, 0.20\text{ MPa}$ 、 $Q=1.2 \sim 3.9\text{ kW}$ の範囲のいずれの条件もチャーン流の領域であった。

^{**2} 実験条件が同じ場合の全放熱量は約 900 W であり、各部放熱量の全放熱量に対する割合は、上部ドラム、蒸発管、降水管、下部ドラムでおおの概略 $55:30:14:1$ であった。

蒸発管放熱量 ΔQ を 0.3 kW とした場合の計算値が、実験値とよく一致しているが、この放熱量は別途行った放熱量測定実験の結果^{**2}とほぼ一致している。

3・1・2 循環速度 次に図2と同じ条件における循環速度 U の測定結果および蒸発管の放熱量をパラメータとした計算結果を加熱量 Q に対して図3に示す。計算値は、蒸発管と降水管の密度差に起因する駆動力となる圧力差が各管の入口と出口損失項、降水管と蒸発管の摩擦項、そして蒸発管の加速項に起因する圧力損失の和とバランスするように循環速度を繰返し計算で求めた。ここで蒸発管の重力項は、Thom の式より求めた $\bar{\alpha}_e$ に相当する蒸発管出口密度 ρ_e と飽和温度に対応する蒸発管の沸騰開始点での密度 ρ_{in} を次式⁽⁷⁾に代入した蒸発管内平均密度 $\bar{\rho}_u$ を用いて計算した。

$$\bar{\rho}_u = \frac{1}{1/\rho_e - 1/\rho_{in}} \cdot \ln \frac{\rho_{in}}{\rho_e} \quad \dots\dots\dots (2)$$

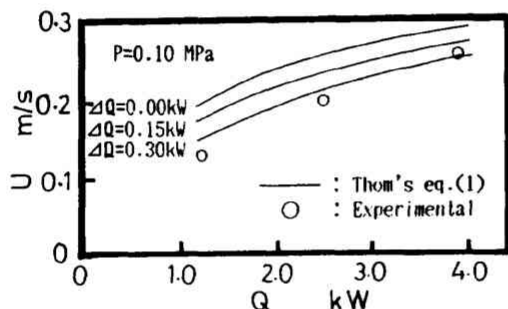


図3 循環速度

蒸発管の摩擦損失項は Martinelli-Nelson の相関式⁽⁸⁾ また加速損失項は分離流モデルの式⁽⁹⁾ を用いてそれぞれ計算した^{**3}。図3より加熱量 Q が大きくなると循環速度も大きくなっている。すなわち図2より加熱量が大きくなると蒸発管出口ボイド率も大きくなり、水循環の制限要因となる圧力損失の増加に比べて、駆動要因となる蒸発管と降水管の密度差が増加して循環速度が増加するためと考えられる。

3・2 動特性結果

3・2・1 一般的応答 圧力 $P_0 = 0.1$ MPa, 水位 $h_0 = 30$ cm, 水温 $T_0 = 9^\circ\text{C}$ の初期条件において加熱量 Q を 0.73.9 kW にステップ状に増加させたときの上部ドラム、蒸発管の出口、入口の各温度(以下、それぞれ、 T_1 , T_2 , T_3 と称する)、ドラム圧力 P 、ドラム水位 Δh 、循環速度 U 、蒸発管入口出口の差位 ΔP の各応答を図4に示す。横軸は加熱開始からの時間である。まず温度については蒸発管出口の T_2 が立ち上がり、次に蒸発管入口の T_3 が2 min ほど遅れて上昇し始め、20 min ほどでほぼ同じ温度になり、次にそれまで非常に緩やかに上昇していた T_1 の上昇割合が急激に大きくなり、遂に約 45 min で T_2 , T_3 とほぼ同じ温度になる。その後各部温度はドラム圧力の一定割合の上昇に伴い三者の温度は同じく上昇していく。ここで、 T_2 が約 55°C でいったん低下しているが、これは自然循環が開始して、降水管からの冷たい水が入ってきたためと考えられる。

水位上昇値 Δh (初期水位からの差、図4中△印)に

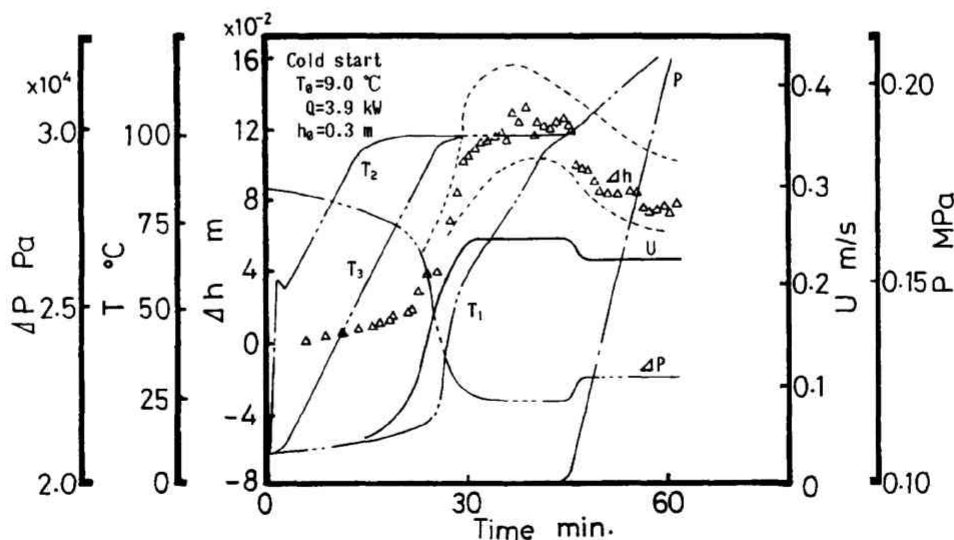


図4 加熱量突変による一般的応答

^{**3} 本実験範囲では各損失の割合は重力項が 96.9~99.8 %, 摩擦損失が 0.1~1.8 %, 加速損失が 0.1~1.3 % である。

関しては、初め温度上昇による比容積増加分だけ上昇し(約 18 mm)、やがてサブクール沸騰、飽和沸騰に伴う容積増加のため急激に上昇していく。その後沸騰状態で蒸発による液量の減少により徐々に低下していく。ここで図 4 中△印の水位と上と下の破線は水位脈動の最大値と最小値をそれぞれ示している。また最高水位になった後、水位は急に低下するが、これは蒸気流量調節弁を閉じたことに起因する。図 4 中実線で示す循環速度 U はサブクール沸騰開始によるボイド発生と同時に急激に上昇し、その後一定となり水位と同様に蒸気流量弁を閉じると少し(0.02 m/s ほど)減少している。これに対応して蒸気管入口出口の差圧 ΔP が増加しており、差圧の変化はボイド率の変化が支配的であることから、その循環速度の減少は蒸気流量弁を閉じたときボイド率が減少したためと考えられる。

圧力は、 T_1 , T_2 , T_3 がほぼ同じ値となった約 45 min から一定の圧力上昇割合(14 kPa/min)で上昇している。

3.2.2 初期温度の影響

(1) 温度、圧力応答 初期圧力 $P_0=0.1$ MPa, 初期水位 $h_0=30$ cm で、初期水温 $T_0=9^\circ\text{C}$ (コールドスタート), 50°C (ウォームスタート) の各場合において Q を $0 \rightarrow 3.9$ kW に変化させたときの上部ドラム、蒸発管出口、入口の各温度(T_1 , T_2 , T_3)の応答を図 5 に示す。各温度応答は初期温度によらず定性的に同じ傾向を示している。しかし、飽和温度となるまでの時間は初期温度の高いほど早いので全体にその応答が早くなっている。

次に、上と同じ条件における上部ドラム内圧力 P の応答を図 6 に示す。圧力は T_1 , T_2 , T_3 が飽和温度に達した時点で上昇し始めるが、その後初期温度によらずほぼ同じ上昇割合(14 kPa/min)で増加している。すなわち、一次積分要素にむだ時間が加わった形で表される。圧力応答に対する初期温度の影響については、圧力上昇割合は初期温度に何ら関係せず、むだ時間が初期温度の高いほうが短くなる。

(2) 水位・自然循環速度応答 図 5 と同じ条件における水位と循環速度の応答を図 7 に示す。水位応答に対する初期温度の影響は小さく、水位が急激に上昇するまでの時間の差が他の温度、圧力と同様に初期温度の差に影響される。この初期温度の低いほど最高水位が高いのは、沸騰までの温度上昇による液体の比容積変化が原因である。

循環速度応答に対しては、立上りまでの時間は同様に初期温度に依存するが、立ち上がってからの循環速度は初期温度に関係なくほぼ同じ値を示す。これは図

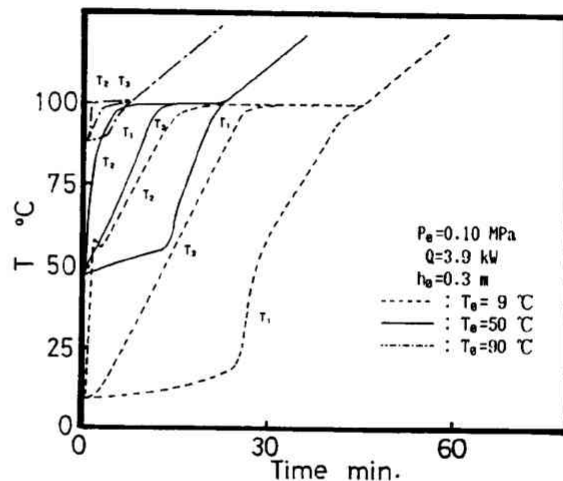


図 5 初期水温の各部温度応答への影響

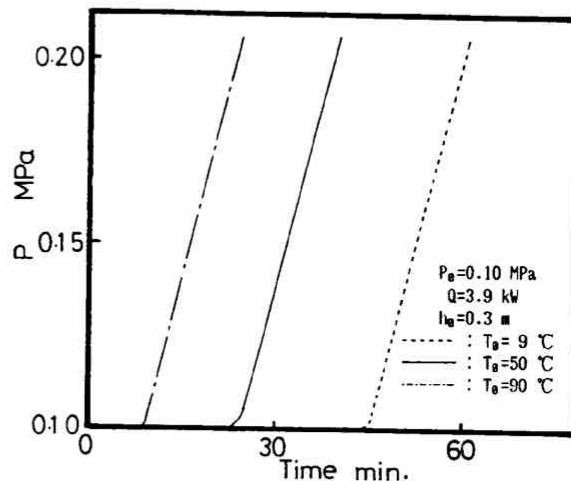


図 6 初期水温のドラム圧力応答への影響

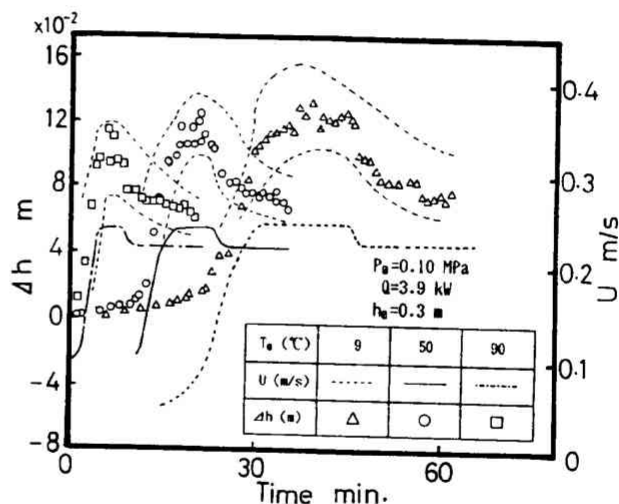


図 7 初期水温のドラム水位応答と循環速度応答への影響

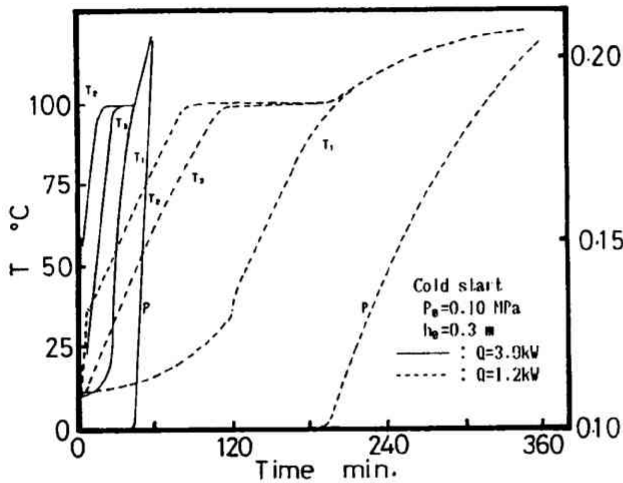


図8 加熱量の各部温度応答とドラム圧力応答への影響

2から推定すると定常状態になってからは蒸発管内のボイド率が加熱量一定で同じために循環速度が等しいと考えられる。そして水位応答と循環速度応答はよく似た傾向を示していることがわかる。

以上よりコールドスタートとウォームスタート時の各応答はいずれも定性的には同じであることがわかった。

3・2・3 加熱量の影響

(1) 圧力・温度応答 初期圧力 $P_0=0.1$ MPa, 初期水位 $h_0=0.3$ m で, $T_0=9^\circ\text{C}$ からのコールドスタート時の各加熱量 $Q=1.2, 3.9$ kW における各部温度 (T_1, T_2, T_3) と上部ドラム内圧力 P の応答の一例を図8に示す。温度の応答は加熱量に関係なく同じ傾向を示している。次に圧力応答は, 加熱量が多いほどむだ時間が短く, 圧力上昇割合は大きくなることがわかる。ここで $Q=1.2$ kW のときの圧力上昇が一定の直線状の圧力上昇割合から時間とともに離れていくのは, 放熱の影響のためと考えられる。

(2) 水位・循環速度応答 次に同じ条件における水位上昇値 Δh と自然循環速度 U の応答を図9に示す。最高水位上昇値と循環速度は加熱量が多いほど増加することがわかる。これらは図2よりわかるように加熱量が大きくなるとボイド率が增大するためである。

なおウォームスタート時の加熱量の各応答に及ぼす影響もコールドスタート時のそれらと定性的に同じである。

4. 結 言

自然循環ボイラのコールドスタート, ウォームスタ

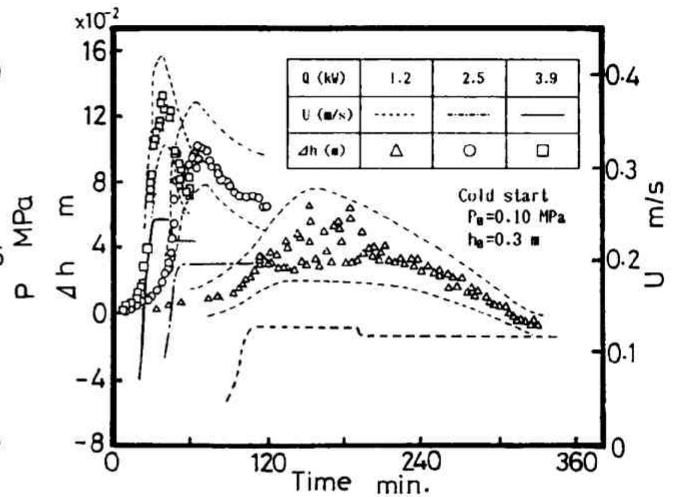


図9 加熱量のドラム水位応答と循環速度応答への影響

ート, すなわち初期水温の異なる場合の加熱量突変による過渡応答実験を行い, 次のことが明らかとなった。

(1) 水位応答特性は, ボイラ水の初期温度と加熱量の大きさを変えたいずれの場合も定常的に同じである。しかし, 水位変化量の最大値は, 初期温度が高いほどあるいはステップ状加熱量が小さいほど小さい。

(2) 圧力・温度の応答特性は, ボイラ水の初期温度や加熱量に関係なく, 定性的に同じである。

(3) 循環速度の応答特性は, ボイラ水の初期温度, ステップ状加熱量を変えたいずれの場合も定性的に同じである。しかし, 最大循環速度は初期温度の影響を受けないが, 加熱量が多いほど増加する。

本研究を行うに当たり技術資料を提供していただいたタクマ(株)の野村稔郎部長と土本信孝課長に, また本論文作成に協力してくれた国弘卓巳君に謝意を表す。

文 献

- (1) 寺野・竹内, ボイラの自動制御, (1969), 113, オーム社。
- (2) Chien, K. L. and Ergin, E. L., ほか2名, *Trans. ASME*, (1958), 1809.
- (3) 坂本・老固・原, 川崎重工技報, 第45号, (1972), 7.
- (4) 友田・老固, 日本船用機関学会誌, 2-5(1967), 57.
- (5) 佐々木・ほか4名, 日立造船技報, 35-2(1974), 20.
- (6) 石黒・日下, 火力発電, 23-9(1972), 911.
- (7) 石谷・赤川, ボイラの水循環, (1953), 50, コロナ社。
- (8) 日本機械学会編, 気液二相流技術ハンドブック, (1989), 75, コロナ社。
- (9) 植田, 気液二相流-流れと熱伝達-(1981), 23, 養賢堂。
- (10) 古亭, 自然循環ボイラにおける水循環の動的特性と不安定流動に関する研究, 博士論文, (1988)。